

На правах рукописи

Бирюков Алексей Валерьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ ЦИЛИНДРА ВЫСОКОГО
ДАВЛЕНИЯ ПАРОТУРБИНОЙ УСТАНОВКИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ
НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Специальность 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011г.

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном
политехническом университете

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Рассохин Виктор Александрович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук Кирилов Александр Иванович

кандидат технических наук Гаев Валерий Дмитриевич

Ведущее предприятие: ЗАО «Институт энергетического
машиностроения и электротехники»

Защита состоится «13» декабря 2011 г. в 16⁰⁰ час. на заседании диссертационного
совета Д 212.229.06 в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный поли-
технический университет» по адресу 195251, Санкт-Петербург, Политехническая
ул., д.29, Главное здание, ауд. 235.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО
«СПбГПУ»

Автореферат разослан «__» ноября 2011г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
Д.212.229.06. к.т.н. доцент

В.А. Талалов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Ведущая роль в производстве электрической энергии принадлежит паротурбинным установкам. Выполнение неравного графика электрической нагрузки обеспечивают пиковые и полупиковые паровые турбины. В рабочем процессе таких турбин важное место занимают отсеки с сопловым парораспределением. Условия работы регулирующей ступени (РС) приводят к значительной окружной неравномерности параметров потока в камере, расположенной за ней, что существенно влияет на экономичность первой нерегулируемой ступени давления (СД) и всего цилиндра высокого давления (ЦВД).

Анализ экспериментальных и теоретических данных показал, что влияние конструктивных и режимных параметров на работу отсеков с сопловым парораспределением остается недостаточно изученным. Полученные результаты дают основание полагать об имеющемся резерве повышения экономичности указанных отсеков за счет совершенствования их конструкции. Поэтому экспериментальные исследования отсеков с РС являются актуальными и представляют определенный практический интерес.

Объект исследования. Объектами исследования являются:

- изолированная парциальная ступень;
- парциальная турбинная ступень с расположенной за ней камерой и последующим направляющим аппаратом (НА) ступени давления (СД).

Цель работы:

Повышение экономичности ЦВД паровой турбины за счет совершенствования отсека с сопловым парораспределением.

Задачи исследования :

- исследование парциальной ступени в изолированных условиях с целью определения ее эталонных и суммарных характеристик;
- исследование влияния межступенчатого расстояния на работу элементов отсека РС – камера – СД;
- исследование влияния входной окружной неравномерности, обусловленной парциальным подводом рабочего тела (р.т.), на коэффициент неравномерности и потери энергии в камере с последующем НА СД;

- исследование влияния геометрических параметров камеры на уровни окружной неравномерности потока и потерь энергии;
- исследование влияния режима работы РС на характер распространения потока в камере.

Для решения поставленных задач потребовалось:

- разработать методику экспериментальных исследований и программу обработки опытных данных;
- определить интегральные характеристики РС в составе отсека и при работе в изолированных условиях;
- исследовать влияние режима работы РС и межступенчатого зазора на характер течения потока в отсеке.

Методы исследования и достоверность полученных результатов

Решение поставленных задач выполнялось с использованием разработанной программы проведения экспериментов для изучения суммарных характеристик моделей ступеней в изолированных условиях и при их совместной работе в отсеке, анализа структуры потока в характерных сечениях ступеней и камеры.

Достоверность полученных результатов обеспечивалась применением современной измерительной техники, повторяемостью опытных данных, проведением оценки погрешности измерений, сопоставлением полученных результатов с данными других исследователей.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

- разработана классификация существующих конструкций камер за РС, сделаны обобщения и установлены закономерности их проектирования;
- установлено влияния межступенчатого зазора на экономичность работы РС;
- обнаружено влияние режима работы РС и межступенчатого зазора на окружную неравномерность параметров р.т. за НА СД.

Практическая значимость работы заключается в том что:

- обоснованы и исследованы геометрические и режимные параметры, оказывающие влияние на характер течения потока в отсеке паровой турбины с сопловым парораспределением. Определены их оптимальные значения, позволяющие снизить коэффициент потерь энергии на 40%, неравномерность параметров потока на 35%;

- разработана, создана и оснащена измерительными системами материально-техническая база для исследования модельных отсеков паровых турбины малой мощности с сопловым парораспределением.

- предложены конструктивные решения построения РС и камеры за ней, позволяющие повысить КПД ЦВД паровых турбин.

Реализация и внедрение результатов работы.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании новых и модернизации эксплуатируемых турбин с сопловым парораспределением.

Личный вклад автора заключается в следующем:

- проведение анализа конструкций отсеков паровых турбин с сопловым парораспределением и составление их классификации;
- проведение экспериментальных исследований РС;
- проведение исследований течения р.т. в камере за РС при различных вариантах ее конструктивного исполнения;
- проведение анализа полученных экспериментальных данных;
- разработке конструктивных решений по совершенствованию камеры за РС.

Автор защищает:

- результаты теоретических исследований характеристик РС и камеры за ней;
- результаты экспериментального исследования течения р.т. на выходе из исследуемого отсека;
- результаты влияния режимных и геометрических параметров на характер работы элементов отсека;
- решения по совершенствованию конструкции отсеков паровых турбин с сопловым парораспределением.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах и конференциях:

1. Региональная конференция «Достижения молодых учёных в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании», Брянск, БГТУ, 11-13 октября 2010 г.

2. XVIII Школа семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в новых энергетических технологиях» Звенигород 23-27 мая 2011г.

3. Заседание кафедры «Тепловые двигатели» БГТУ сентябрь 2011.

4. Научно технический семинар на тему «Повышение экономичности цилиндра высокого давления паротурбинной установки малой мощности на основе экспериментальных исследований», СПбГПУ Санкт-Петербург, СПбГПУ, 06.10.2011.

5. III Международная научно-практическая конференция «Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании», Брянск. БГТУ 10-12 октября 2011 года.

Публикации. По результатам диссертационной работы были опубликованы тезисы докладов на различных конференциях, 5 научных статей, в том числе четыре публикации в изданиях из перечня ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Она изложена на 114 страницах текста и содержит 57 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 69 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируется цель, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, дается краткое содержание глав работы.

В первой главе представлен обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованиям ступеней с парциальным подводом р.т., изучению влияния входной неравномерности на работу ступеней давления. Рассмотрены проблемы конструктивного совершенствования отсеков за парциальной ступенью.

По результатам обзорного материала установлены методы экспериментального определения потерь, влияющих на экономичность парциальной ступени. Проанализированы технические решения организации подвода р.т. к РС.

Выполнен анализ методов экспериментального исследования парциальных ступеней и определения их характеристик при различных режимных и конструктивных параметрах. Рассмотрены работы, сделанные на основе численного моделирования.

Обзор литературных данных показал наличие обширного материала, посвященного исследованию работы парциальной ступени. В то же время недостаточно внимания уделено изучению влияния условий работы парциальной ступени на последующие ступени давления.

Отмечено, что большая часть работ, посвященных данной проблеме, была выполнена на базе ХТЗ, БИТМ, МЭИ. В указанных работах отражены наиболее сильные и слабые стороны исследований, обозначены недостаточно хорошо изученные вопросы, возникающие при проектировании отсеков с РС.

На основании литературных данных сформулированы цели и задачи настоящего исследования.

Во второй главе представлен анализ конструкций турбин малой мощности с сопловым парораспределением. Выполнен обзор схем построения проточных частей турбин, выпускаемых КТЗ, ЛМЗ, ТМЗ. Введены масштабные коэффициенты, позволяющие провести сравнение геометрии камер различных машин. Это позволило определенным образом классифицировать рассмотренные турбины. На основании проведенной классификации сделано сравнение наиболее часто встречаемых вариантов построения камер и получены следующие закономерности:

1. Средний диаметр рабочего колеса РС и средний диаметр направляющего аппарата ступени давления сохраняют свои значения для большинства турбин.

2. Высоты рабочих лопаток РС и направляющих лопаток ступени давления значительно изменяются для разных машин в зависимости от начальных параметров турбины и выбранной степени парциальности.

3. В 40% случаях используются корневые обводы канала, периферийные обводы канала используются реже.

4. Не выявлено закономерности в выборе объема камеры за РС, величина которого имеет широкий диапазон изменения.

5. Осевая ширина камеры за РС, необходимая для выравнивания потока в окружном направлении после парциальной ступени, находится в широких пределах ($\Delta\bar{z} = 1...5$) ($\Delta\bar{z} = l_{ПКРС} / \Delta z$, где $l_{ПКРС}$ – высота лопатки рабочего колеса РС; Δz – осевая ширина камеры) при среднем значении коэффициента $\Delta\bar{z} \approx 2$.

Очевидно, что от величины диаметров РС и СД значительно зависит характер входа потока в ступень давления. При больших углах поворота потока неизбежны потеря кинетической энергии, возникновение отрывных зон в камере за РС, сопровождающихся значительной неравномерностью параметров на входе в СД. Поэтому для улучшения характера течения к диафрагме СД часто крепят специальные обтекатели и другие устройства.

В отсеках РС-камера-СД расстояние между ступенями Δz выполняется значительно большим, чем в обыкновенной проточной части. Увеличение этого расстояния позволяет уменьшить неравномерность потока пара на входе в СД, но приводит к возрастанию путевых потерь и увеличению осевых размеров турбины. Поэтому Δz должен выбираться с учетом указанных факторов. В общем случае из камеры в СД вытекает кольцевая струя пара, характеризующаяся большой неравномерностью и обладающая определенной закруткой, то есть в СД входит неоднородный поток. Характер течения р.т. в камере зависит от конструктивных особенностей РС и условий ее работы. Выходная кинетическая энергия, покидающая РС, как правило, полностью теряется.

Выполненный анализ сравнительно большего числа существующих конструкций отсеков РС-камеры-СД выявил у них ряд существенных недостатков.

Усовершенствование аэродинамических характеристик отсеков РС и их составных частей возможно путем исследования влияния геометрических размеров камеры и режимных параметров работы РС на эффективность работы ступеней давления.

Выполненный анализ существующих работ, связанных с исследованиями отсеков за РС, а также опыт проектирования, используемый на КТЗ, послужил основой при разработке экспериментального стенда и модельного отсека, (рис.1).

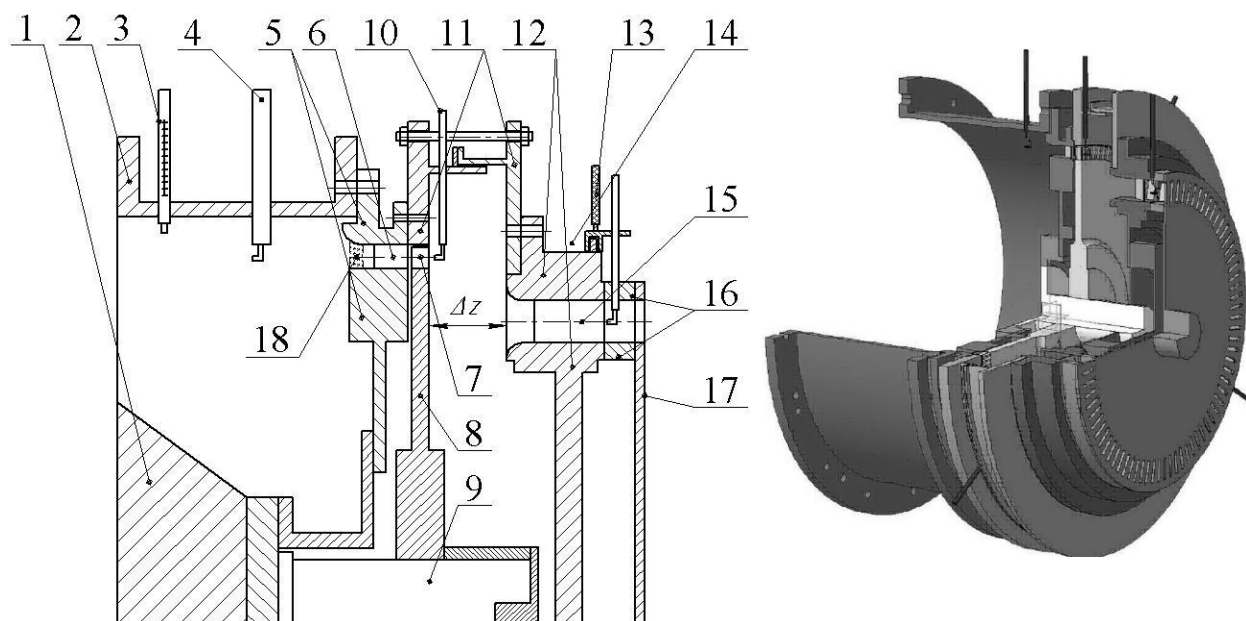


Рис. 1. Схема экспериментальной модели

В состав экспериментального стенда вошли: 1 – индукторный тормоз; 2 – подводящий патрубок; 3 – термометр; 4 – трубка Пито-Прандтля; 5 – диафрагма

РС; 6 – направляющие лопатки РС; 7 – лопатки рабочего колеса РС; 8 – диск рабочего колеса РС; 9 – вал индукторного тормоза; 10, 14 – 5-канальный зонд; 11 – камера за РС; 12 – диафрагма ступени давления; 13 – поворотных механизм для изменения положения зонда; 15 – лопатки НА ступени давления; 16 – периферийный и корневые обводы; 17 – щелевое сопротивления; 18 – специальные устройства для создания парциального подвода. Модельный стенд спроектирован с полным соответствием основным критериям геометрического подобия.

Анализ режимов эксплуатации турбин показал, что регулирующая ступень работает на режимах ниже оптимального $x \leq x_{opt}$. Реже происходит эксплуатация РС на режимах выше оптимального $x > x_{opt}$. В разработанной методике полностью учитываются режимные параметры работы РС. Предусмотрена система контроля за соблюдением основных аэродинамических критериев подобия. Основные геометрические размеры модельного отсека представлены в таблице.

Таблица

Характеристики модельных ступеней отсека

№ п/п	Величина	Единица величины	Ступень 1		Ступень 2	
			НА1	РК1	НА2	–
1	Средний диаметр d_{11}, d_{21}, d_{12}	мм	628,2	628,5	515	–
2	Высота лопатки l_{11}, l_{21}, l_{12}	мм	22,1	24,7	40	–
3	Втулочное отношение v_{11}, v_{21}, v_{12}	–	28,42	25,44	12,87	–
4	Угол выхода $\alpha_{11}, \beta_{21}, \alpha_{12}$	град	11°20'	17°30'	11°20'	–
5	Число лопаток n_{11}, n_{21}, n_{12}	шт	60	234	36	–
6	Отношение средних диаметров d_{12}/d_{11}	–	0,82			
7	Диаметр вала установки d'	мм	85			
8	Диаметр меридионального обвода камеры d''	мм	777			
9	Межступенчатый зазор Δz	мм	26...115			
10	Относительный межступенчатый зазор $\Delta \bar{z}$	–	1,06...4,65			
11	Парциальность РС ε	–	0,23...1,0			

В третьей главе дано описание экспериментальной установки, на которой исследовался модельный отсек, где проводились исследования работы РС и характера течения потока в камере за ней. На модель отсека была установлена современная измерительная аппаратура, позволяющая снимать характеристики работы РС, проводить траверсирование потока в контрольных сечениях.

Схема измерений включала следующие основные приборы:

1. Тахометр ферродинамический дистанционный типа ТСФУ-1 для измерения частоты вращения ротора.
2. Датчики давления для определения усилий на рычаге индукторного тормоза.
3. Мерное нормальное сопло с расположенными на нём датчиками температуры и давления для измерения расхода р.т.
4. Термометры лабораторные ртутные с ценой деления $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, или хромель-копелевые термопары для измерения температуры р.т.
5. Универсальные координатники, позволяющие отсчитывать в процессе траверсирования локальные направления потока и высоту расположения датчика насадка с точностью $0,5^{\circ}$ и $0,5 \cdot 10^{-3}$ м соответственно.
6. Пневмометрические насадки, применяемые для измерений параметров потока в проточной части модели.

В опытах был принят широко используемый в экспериментальных исследованиях турбомашин способ изменения режимов работы ступени при поддержании постоянным отношения давления на отсек, за счет изменения частоты вращения рабочего колеса.

Для определения суммарных характеристик ступени необходимо располагать осредненными значениями параметров потока в контрольных сечениях. Как было отмечено, условия работы РС приводят к значительной окружной и радиальной неравномерностям потока в камере. С целью получения осредненных параметров р.т. проводилось подробное траверсирование контрольных сечений по радиусу и окружности. Длительность и большой объем работы при измерении полей параметров потока в контрольных сечениях вынуждали проводить эти измерения в отдельных опытах. Вследствие этого процесс опытного определения суммарных характеристик камеры выполнялся в несколько этапов:

1. Проведение экспериментального исследования парциального отсека с целью получения суммарных аэродинамических характеристик его элементов по параметрам потока в контрольных точках.
2. Траверсирование потока в контрольных сечениях (2-1 – за РК РС; 1-2 – за НА СД).

3. Приведение полей параметров потока, полученных при траверсировании, к соответствующему режиму в ходе снятия суммарных характеристик по параметрам в контрольных точках.

4. Осреднение приведенных параметров потока в контрольных сечениях. Метод осреднения был основан на сохранении в осредненном течении интегральных величин расхода рабочего тела G и потоков полной энтальпии I^* и энтропии S .

5. Определение эмпирической связи между осредненными параметрами в контрольных сечениях и параметрами потока в контрольных точках, расчет действительных средних значений параметров потока на режимах снятия суммарных характеристик.

6. Расчет искомых действительных суммарных аэродинамических характеристик элементов отсека по действительным средним параметрам потока.

Оценки потери располагаемой кинетической энергии в камере регулирующей ступени рассчитывалась по выражению

$$\zeta = 1 - \left(1 - \left(\frac{p_{12}}{p_{12}^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right) / \left(1 - \left(\frac{p_{12}}{p_{21}^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right),$$

где p_{12} – статическое давление за НА СД; p_{12}^* – полное давление за НА СД; p_{21}^* – полное давление за РК РС.

Неравномерность потока на основе данных траверсирования р.т. рассчитывалась в следующей последовательности:

1. Выполнялся расчет осредненного значения относительного избыточного давления полного торможения

$$\Delta \bar{p}_0^{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_{0i}}{\Delta p_0^{\text{max}}}}{n},$$

где n – число экспериментальных точек.

2. По результатам траверсирования находились две выборки отклонений значений избыточного давления полного торможения

$$\frac{\Delta p_{0j}}{\Delta p_0^{\text{max}}} > \Delta p_0^{\text{cp}} \quad (j=1 \dots k), \quad \frac{\Delta p_{0g}}{\Delta p_0^{\text{max}}} < \Delta p_0^{\text{cp}} \quad (g=1 \dots q)$$

3. Проводилось усреднение избыточного полного давления

$$\Delta \bar{p}_0^{\max} = \frac{\sum_{j=1}^k \frac{\Delta p_{0j}}{\Delta p_0^{\max}}}{f} \quad \text{и} \quad \Delta \bar{p}_0^{\min} = \frac{\sum_{g=1}^q \frac{\Delta p_{0g}}{\Delta p_0^{\max}}}{d},$$

здесь f – число экспериментальных точек, вошедших в первую выборку; $d=n-f$ – число экспериментальных точек второй выборки.

4. Для количественной оценки степени окружной неравномерности использовался коэффициент неравномерности выходного поля давлений за сопловой решеткой:

$$\Phi = \frac{\Delta \bar{p}_0^{\max} - \Delta \bar{p}_0^{\min}}{\Delta \bar{p}_0^{\text{cp}}}.$$

После экспериментальных исследований проведена оценка случайных погрешностей. Значение выполненного расчета величин погрешностей результатов исследований показывает удовлетворительную точность опытов и достоверность полученных экспериментальных данных.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям работы регулирующей ступени и отсека за ней. Как показали результаты опытов, уменьшение относительного межступенчатого зазора (ОМЗ) ниже трех ($\Delta \bar{z} < 3$) приводит к падению КПД РС, что наиболее заметно проявляется для полноподводного режима. Характеристики РС при исследовании в изолированных условиях и при работе в отсеке с камерой при $\Delta \bar{z} = 3,5$ полностью совпадают. При работе РС с камерой при

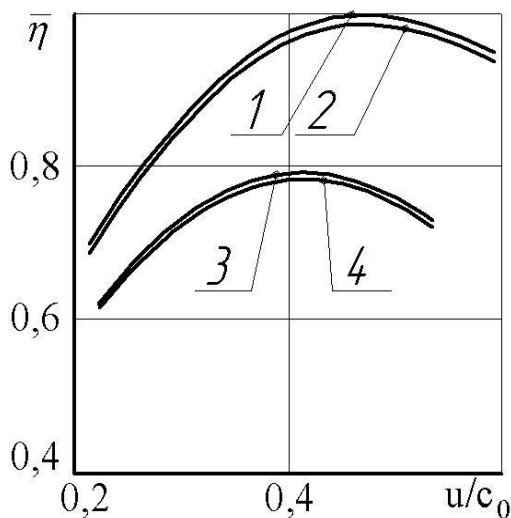


Рис. 2. Относительный КПД РС
 1 – $\varepsilon=1$, $\Delta \bar{z}=3$; 2 – $\varepsilon=1$, $\Delta \bar{z}=1$;
 3 – $\varepsilon=0,23$, $\Delta \bar{z}=3$; 4 – $\varepsilon=0,23$, $\Delta \bar{z}=1$;

$\Delta \bar{z} = 1$ происходит падение КПД на 2%. С увеличением межступенчатого расстояния в отсеке КПД РС достигает значения при ее исследовании в изолированных условиях. На рис. 2 представлены графики изменения относительного КПД для различных уровней парциальности и различных ОМЗ в зависимости от режима работы.

В полноподводном режиме при $\Delta \bar{z}=3...4$ не обнаружено влияния камеры на КПД РС. С уменьшением ОМЗ ($\Delta \bar{z} < 3$) происходит падение КПД РС. Данное явление свя-

зано с тем, что при уменьшении ОМЗ кольцевая струя, выходящая из РК РС, не может беспрепятственно распространяться, а ударяясь в расположенную напротив нее стенку, вызывает рост сопротивления потоку р.т. за РК и приводит к увеличению давления за РС. Изменение КПД ступени при ее работе в парциальном режиме $\varepsilon=0,23$ характеризуется меньшим падением КПД РС. Это обусловлено тем, что при парциальном подводе из РС р.т. вытекает не по кольцевой струе, а по ее ограниченному сектору, который может растекаться не вызывая значительного повышения давления за РС и уменьшения срабатываемого теплоперепада.

Установлена прямая зависимость между градиентом падения максимального

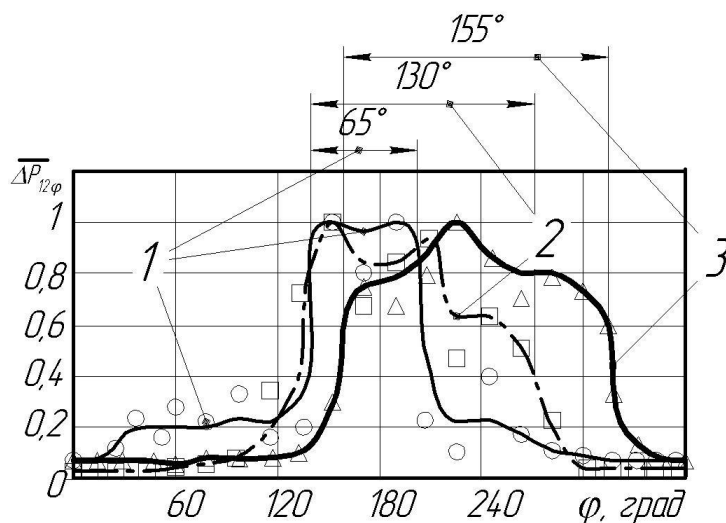


Рис. 3. Распределение относительного давления за НА ступени давления при уровне парциальности $\varepsilon=0,23$ и относительном межступенчатом расстоянии $\Delta \bar{z}=2,5$: 1 — $x < x_{opt}$; 2 — $x = x_{opt}$; 3 — $x > x_{opt}$

версирования потока за НА СД и построения зависимостей получены следующие закономерности. При работе отсека с парциальным подводом р.т. прослеживается влияние режима работы РС на распределение давления за НА СД (рис. 3). Изменение режима работы ($x=u/c_0$) приводит к смещению пика максимальных давлений в сторону закрутки потока.

На режимах ниже оптимального ($x < x_{opt}$) величина распространения активной дуги составляет 65° , при этом коэффициент неравномерности $\Phi=0,92$. При $x \approx x_{opt}$ величина распространения активной дуги составляет 130° , при этом коэффициент неравномерности $\Phi=0,88$. При $x > x_{opt}$ величина распространения активной дуги составляет 155° , коэффициент неравномерности $\Phi=0,84$. Отсюда следует, что с увеличением характеристического отношения $x=u/c_0$ сектор кольцевой струи увеличивается. При этом он смещается в сторону вращения рабочего колеса. Указанное яв-

КПД и степенью парциальности ступени. Чем ниже значение парциальности, тем медленнее происходит падение КПД РС. Так, при работе РС в составе отсека в полноподводном режиме ее КПД становится равным КПД ступени в изолированном режиме при ОМЗ $\Delta \bar{z}=3$, а для ступени с парциальностью $\varepsilon=0,23$ это достигается при $\Delta \bar{z}=2,2$. В ходе тра-

ление сохраняется при уровнях парциальности $\varepsilon=0,23\dots0,7$ и $\Delta\bar{z}=1\dots4$. Однако чем выше значения ε и $\Delta\bar{z}$, тем в меньшей степени проявляется данная зависимость.

Уровень неравномерности, зависящий от характера течения потока в камере,

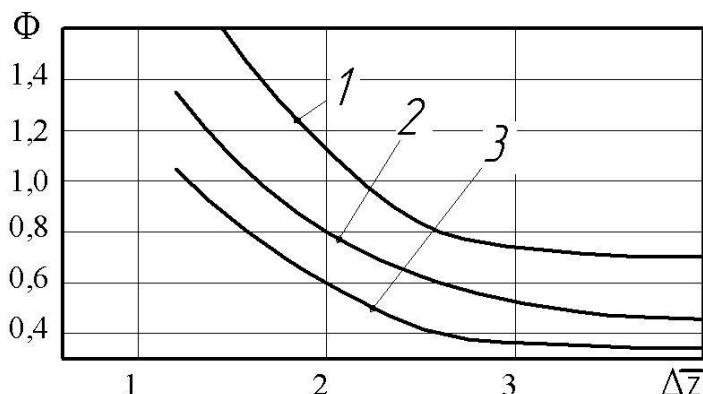


Рис. 4. Распределение коэффициента неравномерности за НА СД для различных уровней парциальности РС в зависимости от относительного межступенчатого расстояния:
1 – $\varepsilon=0,23$; 2 – $\varepsilon=0,5$; 3 – $\varepsilon=0,7$

влияет на работу ступеней давления, и чем он ниже, тем выше КПД ступени. Очевидно, что при увеличении ОМЗ от $\Delta\bar{z}=1$ до $\Delta\bar{z}=2$ происходит резкое падение коэффициента неравномерности, связано это с улучшением картины течения в камере (рис.4). Дальнейшее увеличение осевых размеров камеры также приводит к падению этого

коэффициента, но градиент падения уменьшается. При $\Delta\bar{z}>2,5$ падение коэффициента неравномерности находится в пределах 1...3%. Поэтому для создания равномерного течения следует выполнять камеру с величиной ОМЗ $\Delta\bar{z}>2,5$.

Коэффициент потерь энергии в камере и последующем направляющем аппарате зависит от режима работы РС, степени ее парциальности и геометрии камеры. При этом на оптимальном режиме увеличение $\Delta\bar{z}$ от 1 до 2 позволяет снизить коэффициент потерь на 35...42% в зависимости от уровня парциальности (рис. 5). При $\Delta\bar{z}>2$ происходит наиболее плавное перетекание потока с большего на меньший диаметр, позволяющее получить наименьший уровень потерь. Однако увеличение осевой ширины камеры $\Delta\bar{z}>3,5$ влечет за собой увеличение коэффициента потерь энергии за счет увеличения путевых потерь. Приведенные зависимости сохраняют одинаковый характер для всех исследованных уровней парциальности.

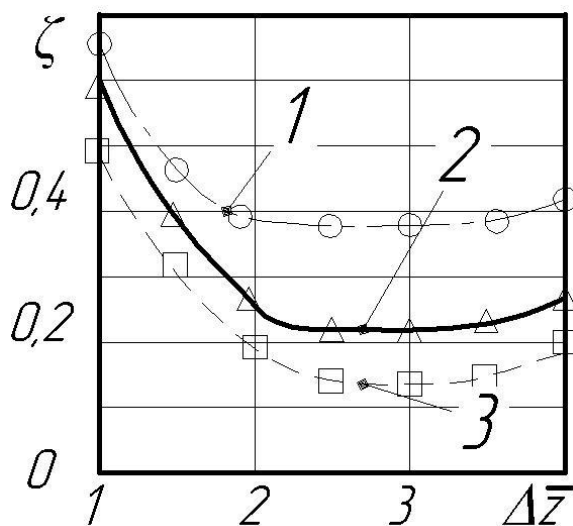


Рис. 5. Изменение коэффициента потерь энергии в зависимости от межступенчатого расстояния для различных уровней парциальности:
1 – $\varepsilon=0,23$; 2 – $\varepsilon=0,5$; 3 – $\varepsilon=0,7$

В ходе опытов была установлена зависимость коэффициента потерь энергии от режима работы РС. На рис. 6 представлены графики изменения относительного

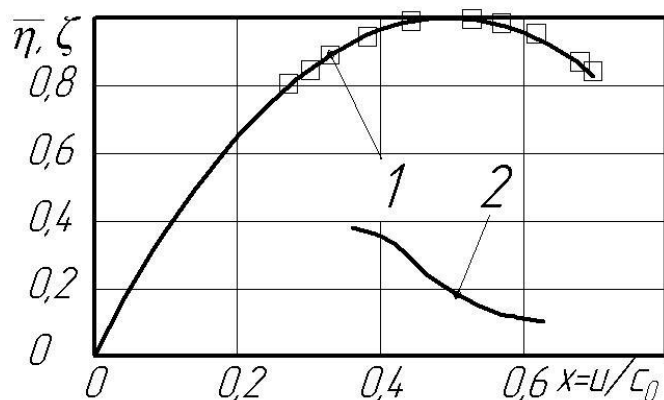


Рис. 6. Изменение коэффициента потерь энергии при работе РС с $\varepsilon=0,23$ и межступенчатым расстоянием 2,5 для различных режимов работы ступени:

1 – КПД; 2 – коэффициент потерь

КПД и коэффициента потерь в зависимости от режима работы РС. Как видно из графиков, наименьший уровень потерь наблюдается при работе РС на режимах выше оптимального. При этом одним из определяющих факторов следует считать закрутку потока р.т. за РК, от которой сильно зависит взаимодействие основного потока с массой газа, заполняющей камеру.

При режиме работы РС $x < x_{opt}$ закрутка $c_{2uPC} < 0$, т.е. вектор основного потока противоположен направлению вращения диска РК РС и массы р.т. в камере. При $x = x_{opt}$ поток за РК практически осевой и $c_{2uPC} = 0$, а рассматриваемые векторы взаимоперпендикулярны. В области режимов $x > x_{opt}$ направления этих потоков совпадают, так как закрутка $c_{2uPC} > 0$. При совпадении направлений течения потоков получаем зону наименьших потерь энергии в камере.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Экспериментальные исследования показали, что условия работы РС приводят к неравномерности параметров потока в камере за ней. На величину коэффициента неравномерности значительное влияние оказывают: режим работы РС, степень парциальности и межступенчатый зазор.

2. В опытах обнаружено влияние межступенчатого зазора на экономичность РС. При уменьшении ОМЗ $\Delta \bar{z} = 2 \dots 1$ КПД РС снизился на 2%.

3. В исследованном отсеке обнаружено различное влияние ОМЗ на потери энергии в камере за РС. При уменьшении ОМЗ ($\Delta \bar{z} < 2$) величина коэффициента потерь ζ увеличивается на 40%, увеличение ОМЗ ($\Delta \bar{z} > 3,5$) приводит к росту потерь энергии на 5...7%. В диапазоне $\Delta \bar{z} = 2 \dots 3,5$ коэффициент неравномерности давления принимает минимальные значения.

4. Установлено влияние режима работы на уровень потерь энергии в исследуемом отсеке. Как показали опыты, наличие положительной закрутки потока за РК в пределах 8...10% обеспечило снижение потерь энергии на 7...9%.

5. Для повышения экономичности работы РС и последующих ступеней давления следует рекомендовать:

- выбор ОМЗ осуществлять в пределах $2 < \Delta \bar{z} < 3,5$;
- на стадии проектирования принимать меры по обеспечению положительной закрутки потока за РК РС (100...105°) в пределах рабочего диапазона переменных режимов работы паротурбинной установки.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК:

1. А.В. Бирюков, А.В. Осипов, И.Г. Гоголев. Структура потока в межступенчатом зазоре при переменных режимах работы модели отборного отсека паровой турбины // Вестник БГТУ. – Брянск: БГТУ. – 2009. – №1. – С.43-49.

2. А.В. Бирюков, А.Н. Голушко, А.В. Осипов. Повышение эффективности работы парциального отсека паровой турбины с использованием физического и численного моделирования // Научно-технические ведомости СПбГПУ/. – С.-П. – 2010. – №3. – С. 40-45.

3. А.В. Бирюков, В.Т. Буглаев, А.Н. Голушко, А.В. Осипов. Определение интегральной характеристики полноподводной одновенечной турбинной ступени численными методами // Вестник БГТУ. – Брянск: БГТУ. -2011. – №2. – С. 47-54.

4. А. В. Бирюков, А.Н. Голушко, А. В. Осипов. Результаты экспериментального исследования течения потока в уравнильной камере за регулирующей ступенью // Вестник БГТУ. – Брянск: БГТУ. – 2011. – №3. –С. 80-87.

Работы, опубликованные в других изданиях:

5. А.В. Бирюков, А.В. Осипов, А.Н. Голушко. Исследование камеры за регулирующей ступенью // Совершенствование энергетических машин: сборник научных трудов. – 2009. – С. 144-167.

6. А.В. Бирюков Исследование работы ступени давления при парциальном подводе к регулирующей ступени // Актуальные вопросы современной техники и технологии II-я Междунар. науч. заоч. конф. / ред. А.В. Горбенко. – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2011. –С. 124-126.

7. А.В. Бирюков, В.Т. Буглаев, А.В. Осипов, А.Н. Голушко. Пути повышения эффективности работы парциального отсека паровой турбины // Совершенствование конструкции элементов турбоустановок, системы технического обслуживания и ремонта, внедрение инновационных разработок: сб. науч. трудов / под ред. В.Т. Буглаева – 2010. – С.29-38.

8. А.В. Бирюков, Совершенствование парциального отсека паровой турбины // Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. И.А. Лагерева. – Брянск: БГТУ, 2011. – Ч. 1. с.69-71.

9. А.В. Бирюков, Экспериментальное исследование зависимости геометрии камеры за регулирующей ступенью на характеристики потока в первом сопловом аппарате ступени давления паровой турбины малой мощности // Проблемы газодинамики и теплообмена в новых энергетических технологиях: тезисы докладов XVIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. Звенигород, 2011. с. 325-327.

10. А.В. Бирюков, В.Т. Буглаев, А.В. Осипов, А.Н. Голушко. Пат. Российская Федерация, МПК F01D 17/14, F01D 9/04. Система регулирования направлением потока в камере регулирующей ступени паровой турбины. – № 2010112724/06(017880); заявл. 01.04.2010. – 6 с. (Получено положительное решение о выдаче 04.05.2011)